

Utilisation du critère de stabilité de Hill en milieu non saturé pour la modélisation des glissements de terrain de la région de Constantine

B.LAFIFI^a, F. DARVE^b, M/S.NOUAOURIA^a, M.GUENFOUD^a

a. Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique, Université de Guelma, Algérie

b. Laboratoire Sols, Solides, Structures, Risque (L3S-R) INPG/UJF/ Grenoble, France

Résumé :

Les risques naturels restent, en grande partie, inexpliqués dans le cadre des méthodes classiques. De nouvelles approches sont nécessaires pour rendre compte de ce problème. Ce présent travail est basé sur le critère de Hill, en utilisant le logiciel de calcul par éléments finis Plaxis. L'application de cette approche a porté sur la modélisation en milieux non saturés, d'un massif de terrain glissant du site Ciloc à Constantine en Algérie.

Abstract :

The natural risks remain, still badly explained within the framework of the traditional methods. New approaches are necessary to give an account of this problem. This present work is based on the Hill's criterion, by using the computer code by finite elements Plaxis. The application of this approach related to the modelling in unsaturated mediums, of the landslide of Ciloc in the Constantine city in Algeria.

Mots clefs : Instabilité, critère de Hill, éléments finis, milieu non saturé.

1 Introduction

Les risques naturels font l'objet d'importantes recherches qui sont devenues très actives récemment. Les glissements de terrain, les boues torrentielles et les éboulements rocheux sont les manifestations les plus classiques des risques naturels d'origine gravitaire. Afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens, il est indispensable d'analyser ces phénomènes de façon exhaustive, c'est à dire à des échelles très variables en terme d'espace et de temps et en prenant en compte tous les modes de rupture possibles.

En ce qui concerne les glissements de terrains catastrophiques, les approches analytiques et numériques traditionnelles sont aujourd'hui de portée limitée. D'un point de vue mécanique, les problèmes de stabilité des pentes et de glissements de terrain ont longtemps été étudiés dans le cadre de la théorie de la plasticité (Hill, 1958 [9] ; Mandel, 1966 [13] ; Rice, 1976 [16], ...). Historiquement, les premières approches faisaient l'hypothèse de l'associativité du comportement des géomatériaux, c'est-à-dire que la limite élastique était supposée confondue avec la règle d'écoulement, ce qui implique que les lignes de glissement statiques et cinématiques sont confondues. (Darve et Louafa, 2000 [5]). Dans ce cas, la rupture survient lorsque l'angle de la pente est égal à l'angle de frottement au repos du matériau. L'instabilité des pentes a été décrite numériquement à l'aide de deux approches : la théorie de la plasticité d'une part (Duncan, 1996 [7]) et la théorie de la localisation de la déformation plastique (bifurcation par formation de bandes de cisaillement, Rice, 1976 [16]) d'autre part.

De nouvelles approches sont nécessaires pour rendre compte de ces modes particuliers de rupture sous faibles pentes. Pratiquement, la condition suffisante de stabilité de Hill, (1958 [9]) basée sur le signe du travail du second ordre est un critère opératoire pour permettre une analyse des instabilités au niveau local ainsi qu'au niveau global (Louafa et Darve, 2002 [12]). Ainsi, l'instabilité d'un sol peut apparaître non

seulement sous un mode localisé, mais aussi sous un mode diffus où la rupture se traduit par une zone de déplacements chaotiques non organisés. Ce mode de rupture diffus peut se manifester avant le mode localisé. Expérimentalement, les travaux de Georgopoulos, (2006 [8]) après ceux de Chu et Leong (2003 [4]) ont visé à caractériser la rupture diffuse sur des sables lâches par des essais triaxiaux non drainés en compression, les résultats obtenus montrent que l'instabilité induite par une petite force axiale supplémentaire appliquée au pic de la contrainte déviatoire conduit à la rupture diffuse de l'échantillon sans bande de localisation (Servant *et al.*, 2004 [17] ; Khoa *et al.*, 2005 [10]). Les études des instabilités matérielles pour les sables lâche et dense en déformation plane, réalisées par Khoa (2005 [11]) ont déterminé ainsi des domaines de rupture diffuse potentielle qui sont également au sens physique des domaines de bifurcation. Cette classe de rupture peut être décrite par le critère de stabilité s'appuyant sur le signe du travail du second ordre (Hill, 1958 [9]), qui est présenté dans cette communication.

2 Travail du second ordre

Dans le cadre des matériaux associés, Hill (1958 [9]) a proposé une notion de stabilité matérielle qui peut s'énoncer ainsi : un élément matériel est défini comme stable s'il satisfait la condition de positivité du travail du second ordre :

$$d^2W = \underline{\underline{\sigma}} : \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} > 0, \quad \forall \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} \neq 0 \quad (1)$$

$\underline{\underline{\sigma}}$ et $\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}$ étant liés par la relation constitutive du matériau.

La stabilité d'un solide de volume V , appelée stabilité globale, est assurée si la condition (1) est vérifiée en chaque point du volume V . Ceci a été montré par (Bigoni et Hueckel, 1991 [3]) pour le cas des matériaux non associés. Drucker, (1959 [6]), puis (Mróz, 1963 [14]) ont postulé une condition suffisante en terme de travail plastique en élasto-plasticité :

$$d^2W^p = d\underline{\underline{\sigma}} : d\underline{\underline{\varepsilon}}^p > 0, \quad \forall d\underline{\underline{\varepsilon}}^p \neq 0 \quad (2)$$

Remarquons que la condition de stabilité matérielle définie par Drucker (1959 [6]) est différente de celle proposée par Hill (1958 [9]). En effet, Drucker a considéré la déformation plastique suivant son critère à la place de la déformation totale considérée par Hill. Pour les modèles hyperélastoplastiques, le postulat de Drucker (1959 [6]) implique la vérification de la condition de Hill, car $d\underline{\underline{\sigma}} : d\underline{\underline{\varepsilon}}^e \geq 0$ en hyperélasticité, et :

$$d\underline{\underline{\sigma}} : d\underline{\underline{\varepsilon}} = d\underline{\underline{\sigma}} : d\underline{\underline{\varepsilon}}^e + d\underline{\underline{\sigma}} : d\underline{\underline{\varepsilon}}^p \quad (3)$$

3 Implémentation du travail du second ordre dans le logiciel Plaxis

Le code de calcul par éléments finis Plaxis de la société Plaxis B.V., est un logiciel aujourd'hui couramment utilisé dans les analyses d'ouvrages et d'essais géotechniques. Scientifiquement, c'est un outil de modélisation non linéaire en élasto - plasticité non associé, avec prise en compte des pressions interstitielles, doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes. Sur le plan numérique, le logiciel fait appel à des éléments de haute précision (triangle à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc). Le calcul du travail du second ordre local d^2W et global D^2W est réalisé une fois que le calcul par Plaxis ait été fini et en post-traitement.

4 Glissement du site Ciloc à Constatine

Les cinq immeubles du Ciloc sont situés en bordure Sud-Ouest du plateau du KOUDIAT-ATY. Un glissement affecte, depuis février 1987, le versant (de faible pente, 10 à 15 %) au pied du bâtiment B (figure 1). La niche d'arrachement de ce glissement passe à quelques mètres du bâtiment B et se développe sur une centaine de mètres, entraînant avec elle le basculement de ce dernier. D'après Benaïssa & Bellouche (1999 [2]), il semblerait que ces mouvements lents se produisent, essentiellement, dans les sols fins à faible plasticité. Le glissement affecte essentiellement les formations argilo-marneuses. Ces formations renferment par endroits une chenalisation sablo-graveleuse plus ou moins épaisse. Les mesures inclinométriques ont permis de localiser la surface de glissement à une profondeur de 4 m dans le sondage S2 et à 7.9 m dans le sondage S3 (figure 2, Benaïssa et al, 1989 [1]).

5 Modélisation numérique du glissement en milieu non saturé

Le problème hydraulique dans un sol non saturé est beaucoup plus compliqué qu'une modélisation en saturé. En effet, plusieurs sources de non linéarité sont introduites lors de la formulation du problème : la saturation varie lorsque la pression capillaire varie et le coefficient de perméabilité dépend de la saturation.

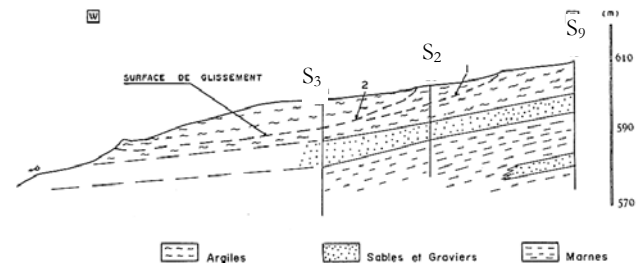


FIG. 1 - Vue des immeubles du site glissé de Ciloc. FIG. 2 - Coupe géologique dans l'axe du glissement de terrain localisé (Benaissa et al, 1989 [1]).

5.1 Modèle de Van Genuchten

La modélisation des écoulements dans les sols non saturés est essentiellement basée sur le modèle analytique de Van Genuchten. Ce modèle, propose une fonction reliant le degré de saturation effective et la pression capillaire de la forme :

$$S_w = S_{rw} + \frac{S_{sat} - S_{rw}}{(1 + (\alpha \cdot p_c)^\beta)^{1-1/\beta}} \quad \text{et} \quad S_{we} = \frac{S_w - S_{rw}}{S_{sat} - S_{rw}} \quad (4)$$

avec :

S_w : degré de saturation

S_{sat} : degré de saturation à l'état saturé (généralement, $S_{sat} = 1$),

S_{we} : degré de saturation effective,

S_{rw} : degré de saturation résiduelle où une augmentation de la succion matricielle n'engendre plus un changement significatif de S_{rw} ,

$p_c = p_a - p_w$: pression capillaire,

α : paramètre lié à la distribution de taille de pores, et plus particulièrement à l'épaisseur de la frange capillaire.

β : paramètre lié à la granulométrie.

Cette fonction signifie, physiquement, que si nous diminuons la teneur en eau en une région du milieu poreux non saturé, cela se répercutera par une augmentation de la pression capillaire.

6 Modélisation

Nous proposons une modélisation hydromécanique couplée en milieux non saturés. Une approche originale de l'étude de la stabilité en se basant sur le calcul et l'analyse du travail du second ordre au niveau local et au niveau global tel qu'il a été présenté et mis en oeuvre dans les paragraphes précédents, sera également utilisée dans la modélisation. L'étude de la stabilité se décompose en deux grandes parties qui sont définies dans le but de simplifier le problème sans en perdre la précision recherchée. Dans la première partie, nous modélisons la montée de la nappe phréatique dans le site jusqu'à son niveau final en milieu non saturé, en utilisant le logiciel Plaxflow pour la génération des pressions interstitielles. Dans la deuxième partie, nous modélisons le site en conditions de déformations planes, en utilisant le logiciel Plaxis en tenant compte des résultats fournis par le logiciel Plaxflow.

6.1 Géométrie et maillage

La géométrie et le maillage du modèle numérique sont présentés sur la figure 3. Le maillage est composé de

1859 éléments triangulaires (15 nœuds, 12 points d'intégration) soit 15267 nœuds.

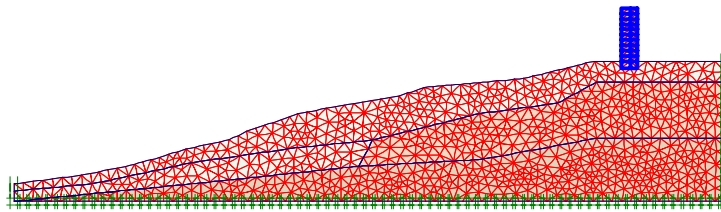


FIG. 3 – Géométrie, maillage et conditions aux limites par éléments finis.

6.2 Conditions aux limites mécaniques

Les conditions en déplacements (cinématiques) sont également présentées sur la figure 3. Nous imposons des déplacements horizontaux nuls selon l'axe X sur les limites à gauche et à droite du modèle et verticaux nuls selon l'axe Y sur le fond du massif.

6.3 Conditions aux limites hydrauliques

Dans les figures 4 et 5, est présenté le niveau de la nappe phréatique, l'eau monte du niveau $H = 45$ m au niveau $H = 70$. Notant que les parois verticales sont perméables par contre le substratum est considéré imperméable.

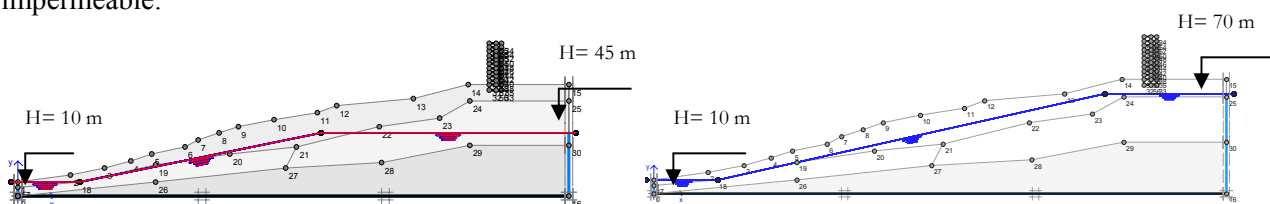


FIG. 4 – Niveau initial de la nappe phréatique. FIG. 5 - Niveau initial de la nappe phréatique.

6.4 Modèle de comportement et caractéristiques hydromécaniques

Le comportement du versant est modélisé avec le modèle élastoplastique HSM du logiciel PLAXIS. Les paramètres principaux du modèle HSM pour les trois types de matériaux sont résumés dans le tableau 1. En ce qui concerne le modèle analytique de Van Genuchten ses paramètres sont tirés du manuel de référence du logiciel Plaxflow et sont données dans le tableau 2.

Couches	Argiles	Sable graveleux	Marnes
Densité sèche γ_d (kN/m ³)	21.0	17.0	18.6
Densité humide γ_h (kN/m ³)	23.0	20.0	21.2
Cohésion c' (kN/m ²)	7.0	1.0	13.0
Angle de frottement ϕ' (°)	24.0	35.0	20.0
Angle de dilatance ψ (°)	0.0	10.0	0.0
Coefficient de Poisson ν	0.20	0.20	0.25
E_{50}^{ref} (kN/m ²)	38000	30000	28000
E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	150000	90000	60000
E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	38000	30000	28000

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques des formations du site de Ciloc.

Caractéristiques	Argile	Sable graveleux	Marne
Saturation S_w	1.0	1.0	1.0
Saturation résiduelle S_{rw}	0.1	0.1	0.1
1 ^{er} paramètre de rétention α	2.7×10^{-5}	14.5×10^{-5}	1.9×10^{-5}
2 ^{ème} paramètre de rétention β	1.41	2.68	1.31

Tableau 2. Paramètres du modèle de Van Genuchten des matériaux du site.

7 Résultats

7.1 Résultats en terme du travail du second ordre local

La représentation des zones, où la stabilité au sens de Hill n'est plus assurée pendant la montée d'eau, est donnée sur la figure 6 (a, b, c et d). Nous observons, dans la figure (6a) une zone de faibles valeurs de d^2W apparaissant au pied du talus. Quand l'eau monte par un pas de 10 m (Figure 6b), une zone de d^2W négatif se développe au pied du talus et s'étend également dans la partie haute du talus. En augmentant le niveau de la nappe jusqu'à son niveau final (hauteur d'eau = 70 m), une grande zone de valeurs négative ou nulle de d^2W est observée (Figure 6d). Nous voyons que cette zone, où le critère de stabilité de Hill est violé, apparaît de manière remarquable de façon superficielle et s'étend au pied de la couche de sable. La grande zone superficielle regroupant les valeurs négatives du travail local permet de mettre en évidence une éventuelle rupture diffuse d'une partie du talus.

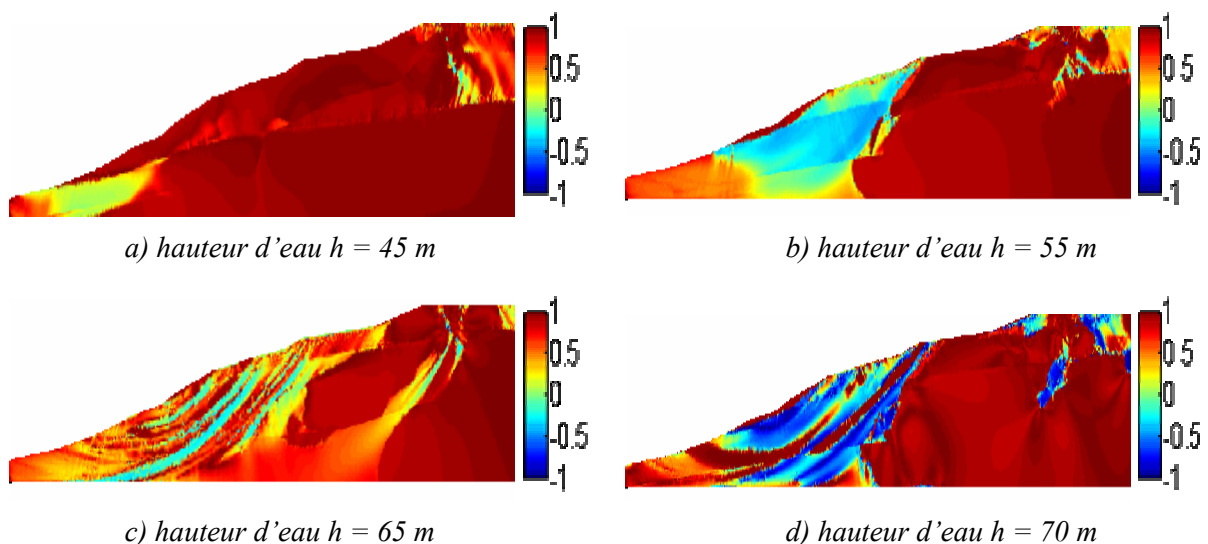


FIG. 6 - Isovaleurs du travail du second ordre local pour six hauteurs de remonter d'eau.

7.2 Résultats en terme du travail du second ordre global

Dans la figure 7 nous présentons l'évolution du travail du second ordre global normalisé D^2W_{norm} en fonction de l'augmentation cumulée du niveau de la nappe d'eau dans le talus. En analysant l'évolution de D^2W_{norm} , nous observons que, dans les premiers pas de calcul, la remontée progressive de la nappe phréatique en régime hydraulique permanent, à partir du niveau initial, provoque une diminution remarquable du travail global normalisé.

En continuant de faire monter la nappe dans la simulation, nous voyons une décroissance considérable du travail du second ordre global qui atteint des valeurs négatives à la fin de la montée d'eau. Une valeur quasiment nulle du travail du second ordre global normalisé à ce stade semble être un bon indicateur pour détecter l'instabilité globale du talus du site de Ciloc.

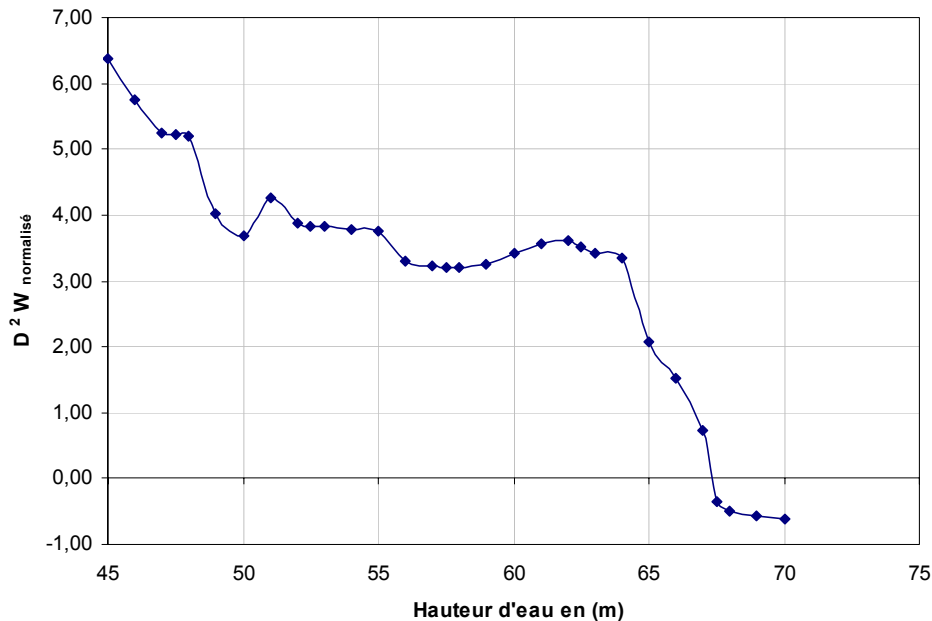


FIG. 7 - Représentation de l'évolution du travail du second ordre global normalisé.

8 Conclusion

Dans cette partie de modélisation, nous avons abordé une simulation en couplage hydromécanique d'un milieu non saturé pour un cas réel tel que celui du site de Ciloc. Une approche originale de l'étude de la stabilité à la fois locale et globale en s'appuyant sur l'analyse du travail du second ordre a permis de retrouver avec un certain succès les principales zones de glissement observées. L'analyse de l'évolution du travail du second ordre global permet de confirmer la stabilité globale du talus, une grande zone superficielle regroupant des valeurs négatives du travail du second ordre permet de mettre en évidence la rupture éventuellement diffuse d'une partie du talus. Nous avons également tâché de prouver la nécessité de l'utilisation de deux critères de stabilité : locale et globale, dans la description des instabilités dans des problèmes réels qui sont souvent complexes en termes de géométrie, de conditions aux limites, de sollicitation, ainsi que de comportement des matériaux, etc.

References

- [1] Benaïssa A., Cordary D. & Giraud A., « les mouvements de terrain dans la zone urbaine de Constantine (Algérie) », Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, n°40, Paris, 1989.
- [2] Benaïssa A., Bellouche M.A. « Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrains dans l'agglomération de Constantine (Algérie) », Bull. Eng. Env. 57 :301-310, 1999.
- [3] Bigoni D., Hueckel T. «Uniqueness and localization- I. Associative and nonassociative elastoplasticity». Int. J. Solids Structures, 28(2):197–213, 1991.
- [4] Chu J., Leong W.K. «Recent progress in experimental studies on instability of granular soil». In Labuz & Drescher, editor, Int. Workshop on Bifurcations and Instabilities in Geomechanics, pages 175–192. Swets & Zeitlinger, 2003.
- [5] Darve F., Laouafa F. «Instabilities in granular materials and application to landslides». Mech. Cohes. Frict. Mater., 5(8):627–652, 2000.
- [6] Drucker D.C. «A definition of stable inelastic material». J. Applied Mech., 26:101–186, 1959.
- [7] Duncan J.M., « State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slope». Journal Of Geotechnical Engineering , 1996; 122(7):577-96.
- [8] Georgopoulos I.O., «Mechanisms of liquefaction of granular materials and the role of fabric anisotropy». PhD thesis, N.T.U.A., (2006).
- [9] Hill R. «A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids». J. of the Mech. and Phys. of Solids, 6:239–249, 1958.

- [10] Khoa H.D.V., Georgopoulos I.O., Darve F., Laouafa F., «Diffuse failure in geomaterials: experiments and modelling». *Computers and Geotechnics*, 2005.
- [11] Khoa H.D.V., Modélisations des glissements de terrain comme un problème de bifurcation. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2005.
- [12] Louafa F., Darve F., «Modelling of slope failure by material instability mechanism». *Computer and Geotechnics*, 29(4), 301-325, 2002.
- [13] Mandel J., « Conditions de stabilité et postulat de drucker ». *Rheology and Soil Mechanics*, J. Kravtchenko and P. M. Sirieys (eds), Springer, Berlin:58–68, 1966.
- [14] Mróz Z., «Non-associated flow laws in plasticity». *Journal de Mécanique*, 2(1):21–42, 1963.
- [15] PLAXIS, Version 8.4, 2006.
- [16] Rice J.R., «The localization of plastic deformation». *Theoretical and applied mechanics*, W.T. Koiter ed, North-Holland publishing Company: 207–220, 1976.
- [17] Servant G., Darve F., Desrues J. and Georgopoulos I.O., «Diffuse modes of failure in geomaterials». In Di Benedetto, editor, *Deformation characteristics of geomaterials*. Swets & Zeitlinger, 2004.